

Anwendung der Lichtwellenleiter-Technik bei der Bauwerksüberwachung

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. P. Warnecke

Januar 1991

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des Landes Niedersachsen "Anwendung der
LWL-Sensortechnik zur Überwachung von Betonbauwerken" - GZ: 2102 - BV 4e - 17/87

Inhalt

1. Einleitung
2. Lichtwellenleiter-Technik
 - 2.1 Aufbau und Funktion von Lichtwellenleitern
 - 2.2 Aufbau und Funktion des Dehnungssensors
 - 2.3 Mechanische Eigenschaften des Dehnungssensors
 - 2.4 Meßtechnik des Dehnungssensors
 - 2.5 Eichung des Dehnungssensors
3. Durchgeführte Versuche
 - 3.1 Dehnkörper
 - 3.2 Biegekörper
 - 3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse
4. Ausblick
5. Literatur

1. Einleitung

Die Überwachung und Beurteilung von Bauwerksverformungen ist in den letzten Jahren verstärkt in das Interesse von Forschung und Anwendung gerückt. Einige typische Anwendungsgebiete sind die Kontrolle der Spannkraftverluste infolge von Kriechen und Relaxation, die Detektion von Ribbildungen im Bereich von Koppelfugen im Brückenbau, die Kontrolle der Dichtigkeit von Behältern und Deponien sowie die Überwachung von Bauwerksverformungen infolge von Eingriffen in den Baugrund.

Das Ziel der meßtechnischen Überwachung ist in allen Anwendungsfällen die automatische Ermittlung und Speicherung von Meßdaten. Diese kann kontinuierlich oder in vorgegebenen Taktfrequenzen erfolgen. Daher bieten sich für die Bauwerksüberwachung zunächst elektrische Meßaufnehmer an. Beispiele hierfür sind Wegaufnehmer, Dehnmeßstreifen oder Kraftmeßdosen. Allerdings weisen diese Meßsysteme unter rauen Einsatzbedingungen eine unzureichende Langzeitstabilität des Meßsignals auf.

Hier bietet die Dämpfungsmessung von Lichtwellenleitern infolge ihrer mechanischen und physikalischen Robustheit entscheidende Vorzüge. Allerdings ist die Korrelation von Dämpfung und Verformung bislang noch nicht ausreichend untersucht, so daß erste Anwendungen dieser Technik im Brückenbau [3] oder in der Offshore-Technik [4] den Lichtwellenleiter nur als qualitativen Detektor von Formänderungen nutzen.

Es ist das Ziel des vorliegenden Forschungsberichts, die grundsätzlichen optischen und mechanischen Funktionsweisen dieser Technik zu beleuchten und die Möglichkeiten und Grenzen einer quantitativen Interpretation der Meßergebnisse aufzuzeigen.

2. Lichtwellenleitertechnik

2.1 Aufbau und Funktion von Lichtwellenleitern [1]

Lichtwellenleiter (LWL) sind dielektrische Leiter, in denen sich Lichtsignale durch Brechung oder Reflexion ausbreiten können. Unter Brechung versteht man die Richtungsänderung eines Lichtstrahls an der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Brechzahl (Bild 2.1)

Die Brechzahl n eines Mediums ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit v in dem entsprechenden Medium.

$$n = \frac{c}{v} \geq 1,0 \text{ [-]}$$

$$\text{mit } c = v \cdot \lambda = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Nach Snellius stehen die Brechzahlen n_1 , n_2 zweier Medien im gleichen Verhältnis zueinander wie der Sinus des Einfallswinkels φ_1 und des Ausfallwinkels φ_2 .

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Damit kann für zwei Medien mit bekannten Brechzahlen derjenige Einfallswinkel φ_1 berechnet werden, bei dem der gebrochene Strahl parallel zur Grenzfläche verläuft ($\varphi_2 = 90^\circ$) (siehe Bild 2.2). Dieser Winkel wird Grenzwinkel φ_G genannt.

Einfallende Lichtstrahlen mit $\varphi_1 < \varphi_G$ treten gebrochen aus dem Grundmedium aus, Lichtstrahlen mit $\varphi_1 > \varphi_G$ werden an der Grenzfläche mit $\varphi_2 = \varphi_1$ reflektiert. Bei der Brechung treten Energieverluste auf, da auch hier die Lichtstrahlen teilweise reflektiert werden. An der Grenzfläche zwischen Luft und Glas betragen diese Verluste maximal 4 %. Bei Einfallswinkeln $\varphi_1 > \varphi_G$ treten keine Energieverluste auf, man spricht von Totalreflexion.

Den einfachsten Aufbau eines Lichtwellenleiters repräsentieren die sogenannten Stufenprofilfasern. Sie bestehen aus einem Kern mit hoher Brechzahl n_1 und einem Mantel mit niedrigerer Brechzahl n_2 . Lichtstrahlen mit

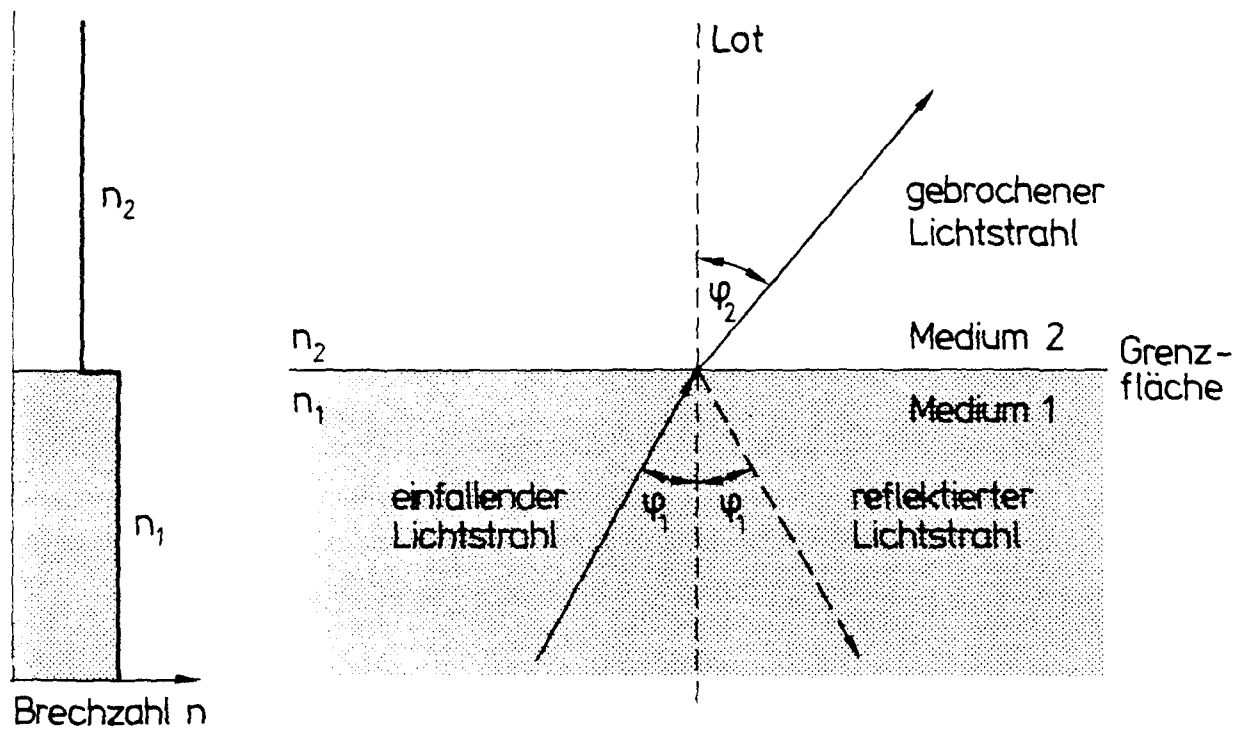


Bild 2.1: Brechung und Reflexion eines Lichtstrahls an einer Grenzfläche

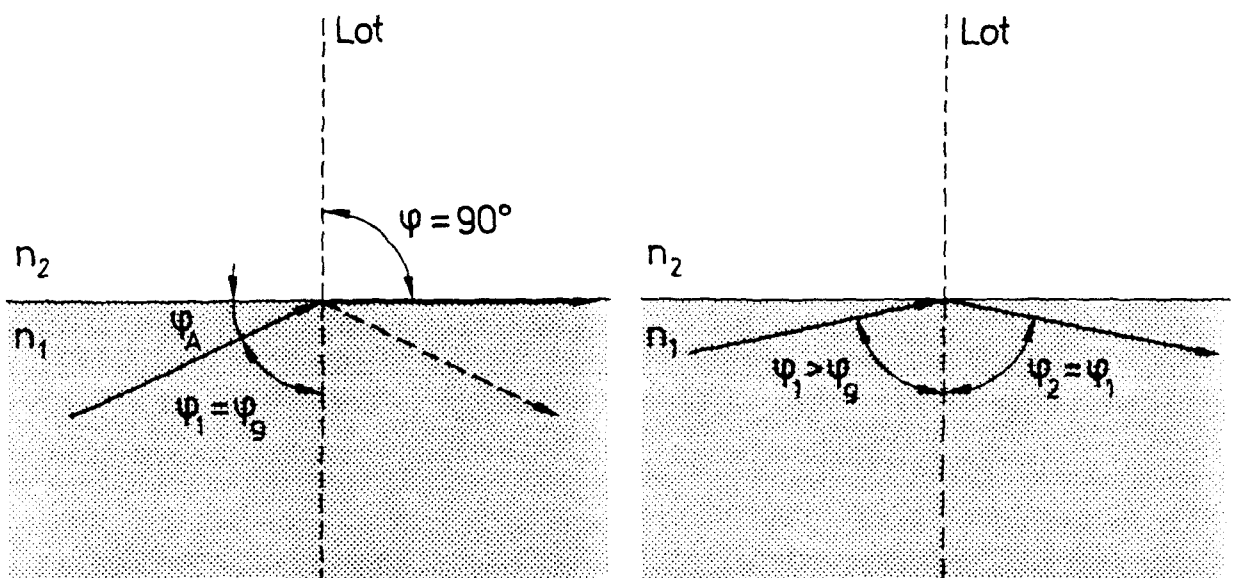


Bild 2.2: Darstellung des Grenzwinkels φ_g (links) und der Totalreflexion (rechts)

einem Einfallswinkel $\varphi_1 > \varphi_G$ werden an der Grenzfläche Kern-Mantel reflektiert, Lichtstrahlen mit einem kleineren Einfallswinkel verschwinden im Mantel (Bild 2.3).

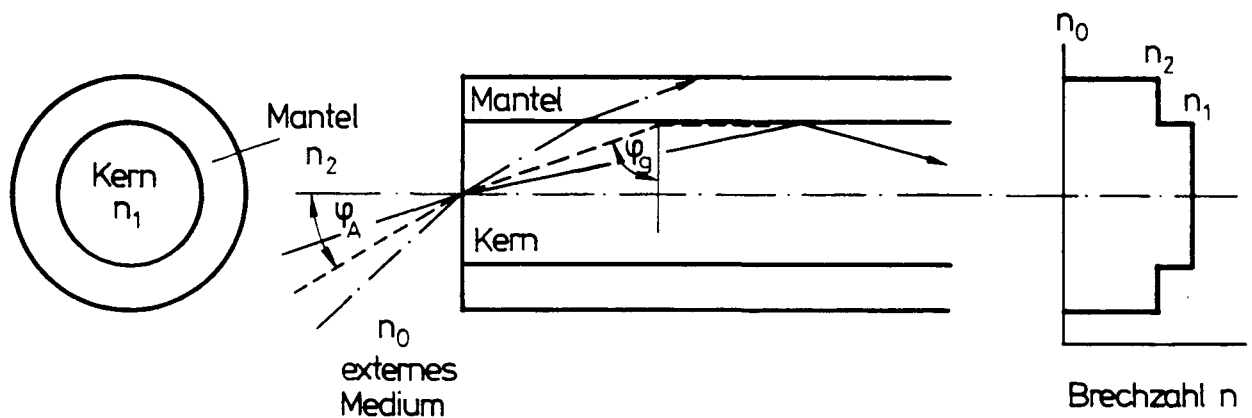


Bild 2.3: Lichtführung in einer Stufenprofilfaser

Wichtigstes Merkmal von Stufenprofilfasern ist die numerische Apertur NA. Sie gibt an, bis zu welchem Öffnungswinkel φ_A Licht auf die Stirnfläche des Kerns auftreffen darf, damit das Licht im Kern verlustfrei reflektiert wird.

$$NA = \sin \varphi_A$$

$$NA = n_1 \sqrt{2 (n_1^2 - n_2^2)}$$

Infolge der Welleneigenschaft des Lichts kann es zu Interferenzerscheinungen der Lichtwellen kommen. Daher ist die Ausbreitung des Lichts nur unter einer diskreten Anzahl von Winkeln möglich, die sich aus der Wellenlänge des Lichts, dem Kerndurchmesser und der numerischen Apertur berechnen läßt. Die ausbreitungsfähigen Wellen heißen Moden. Diese Moden legen im LWL unterschiedlich lange Wege zurück, je nachdem wie oft sie an der Grenzfläche

reflektiert werden. Dies führt zu Laufzeitunterschieden und damit zu einer Verzerrung des Signals (Modendispersion). Bei Stufenprofilfasern liegen die Modendispersionswerte bei 15 bis 100 ns pro Kilometer.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Signalverzerrung besteht darin, den Kerndurchmesser des LWL so zu verkleinern, daß in ihm nur eine Mode ausbreitungsfähig ist. Man spricht dann von Monomodenfasern. Diese weisen jedoch sehr geringe Abmessungen auf (Kerndurchmesser $\approx 5 \mu\text{m}$), wodurch Steckverbindungen sehr aufwendig werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Signalverzerrung besteht darin, das Brechzahlprofil des LWL anzupassen. Da sich das Licht in Medien geringerer Dichte schneller ausbreitet, kann durch eine Verringerung der Brechzahl zum LWL-Rand hin die gleiche Laufzeit aller Moden erreicht werden. Diese LWL werden Gradientenprofilfasern genannt; sie führen das Licht durch Brechung, nicht durch Reflexion (Bild 2.4). Gradientenprofilfasern besitzen im allgemeinen ein parabolisches Brechzahlprofil. Dies muß bei der Berechnung der numerischen Apertur und der Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden berücksichtigt werden.

Bei allen LWL-Typen treten Übertragungsverluste zwischen Sende- und Empfangsimpuls auf. Ursache dieser Dämpfung ist im wesentlichen die Rayleigh-Streuung, die durch Inhomogenitäten des amorphen Werkstoffes Glas entstehen und von der Reinheit der verwendeten Glassorte bestimmt wird. Weitere Verluste treten bei Steckverbindungen und in Mikrokrümmungen auf. Die Energieverluste durch Rayleigh-Streuung und Absorption steigen exponentiell mit der Faserlänge l . Trägt man das Verhältnis von eingekoppelter Leistung P_0 zur Empfangsleistung P_L in dB auf der Ordinate an, erhält man über der Faserlänge einen linearen Verlauf (Bild 2.5). Die Steigung der Geraden wird als Dämpfungskonstante α bezeichnet. Für LWL aus Quarzglas mit einer Wellenlänge von 835 nm liegen die α -Werte bei ca. 3 dB/km.

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} \cdot 10 \cdot \lg \frac{P_0(\lambda)}{P_L(\lambda)} \quad [\text{dB/km}]$$

Zusammenfassend können nach der Art der Wellenausbreitung und der Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden drei LWL-Typen unterschieden werden. Bild 2.6 zeigt diese Zusammenstellung und gibt übliche Durchmesser an.

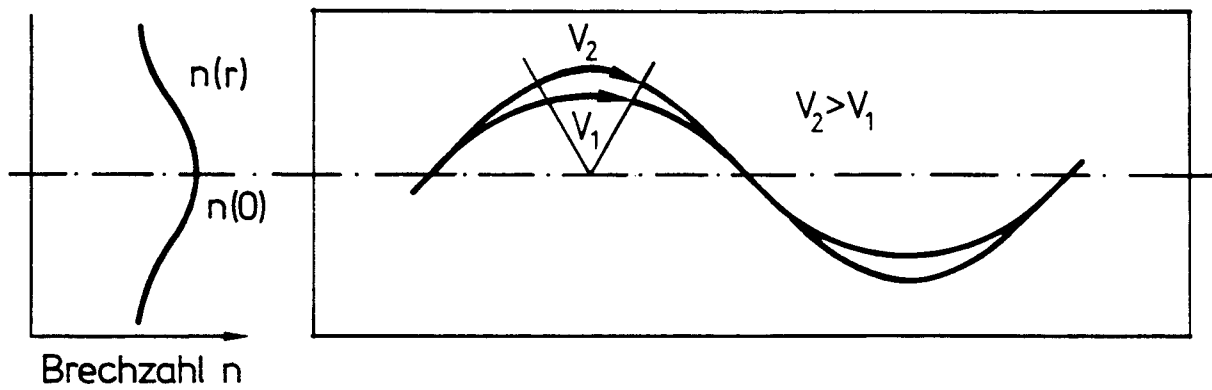


Bild 2.4: Lichtführung in einer Gradientenfaser

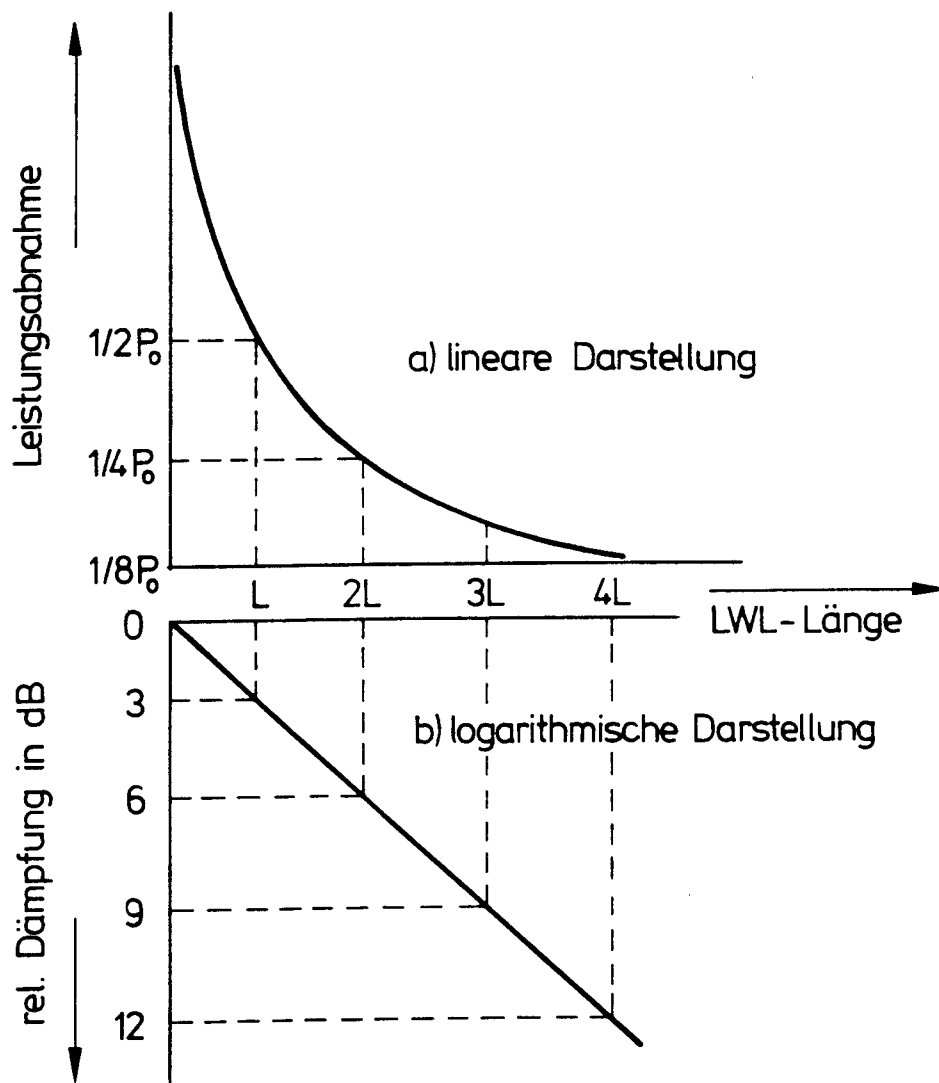


Bild 2.5: Leistungsverlust in einem Lichtwellenleiter

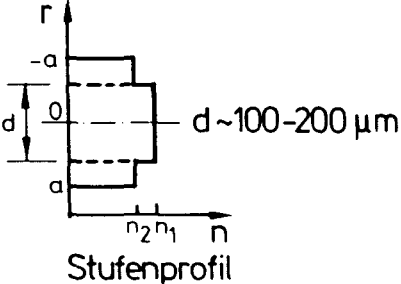
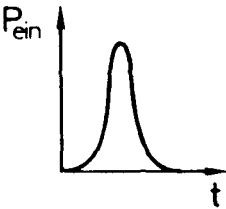
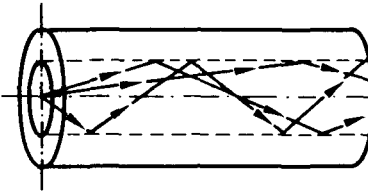
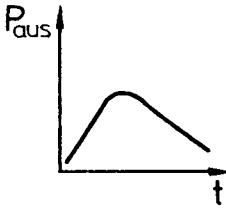
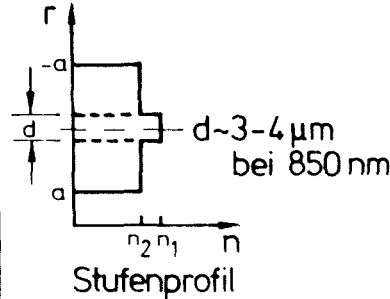
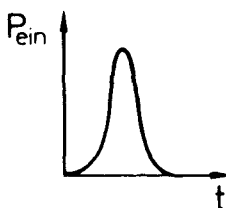
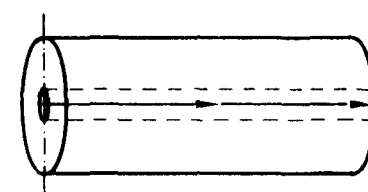
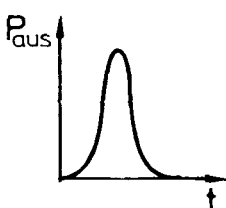
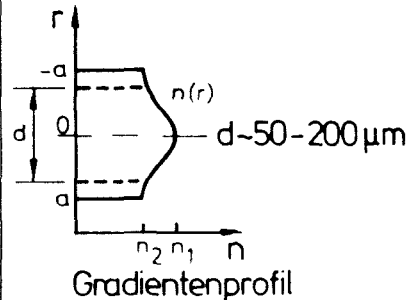
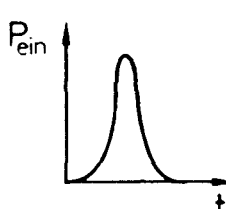
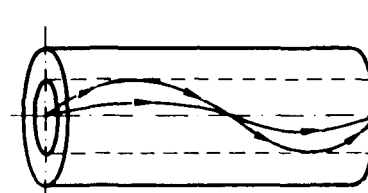
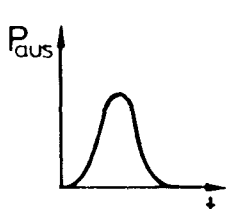
LWL - Typ	Brechzahlprofil	Sendeimpuls	Wellenausbreitung	Empfangsimpuls
Multimode-Lichtwellenleiter mit Stufenprofil	 <p>Stufenprofil</p>			
Monomode Lichtwellenleiter	 <p>Stufenprofil</p>			
Multimode-Lichtwellenleiter mit Gradientenprofil	 <p>Gradientenprofil</p>			

Bild 2.6: Zusammenstellung der Lichtwellenleitertypen und ihrer Ausbreitungseigenschaften

2.2 Aufbau und Funktion des Dehnungssensors

LWL sind außerordentlich empfindlich gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Insbesondere Querdrücke führen zu deutlichen Dämpfungen. Ursache hierfür sind die infolge Querdruck entstehenden Microkrümmungen des LWL. Sie bewirken eine Veränderung des Einfallswinkels der Moden und führen dazu, daß einzelne Wellen aus dem LWL austreten. Wenn die Krümmungsradien klein genug sind, besteht ein konstantes, reproduzierbares Verhältnis zwischen Querdruck und Dämpfung.

Diese Eigenschaft macht man sich bei den sog. Dehnungssensoren zunutze. Von einem deutschen Firmenkonsortium (Felten und Guilleaume Energietechnik, Köln; STRABAG BAU AG, Köln; BAYER AG, Leverkusen) wurde eine Gradientenprofilfaser mit wendelförmiger Umwicklung aus Kupferdraht entwickelt. Zur Verbesserung der mechanischen Robustheit ist dieser LWL kraftschlüssig mit einem Mantel aus GFK versehen (Bild 2.7).

Bei einer Dehnung des Sensors wird der LWL durch die Kupferwendel eingeschnürt. Dies führt zu Microkrümmungen der LWL-Faser und damit zur Dämpfung. Stauchungen des Sensors führen hingegen nicht zu Dämpfungen. Das Dämpfungsverhalten ist neben den optischen Eigenschaften der LWL-Faser vor allem von der Schlaglänge der Wendel abhängig. Die beim Umschnüren der LWL-Faser notwendige geringe Vorspannung der Wendel führt zu einer erhöhten Grunddämpfung des LWL.

2.3 Mechanische Eigenschaften des Dehnungssensors

Die Dehnungssensoren sind zum Schutz vor mechanischen Beschädigungen mit einem Mantel aus Polystal umgeben. Polystal ist ein Markenname der Firmen STRABAG BAU AG und BAYER AG für Glasfaser-Verbundstäbe. Da der Dehnungssensor schubfest mit dem Polystal verbunden ist, werden die mechanischen Eigenschaften maßgebend vom Mantelmaterial bestimmt. Daher sind für den Dehnungssensor folgende Materialkennwerte anzunehmen:

Elastizitätsmodul	$E = 51.000$	$[\text{N/mm}^2]$
Zugfestigkeit	$B_Z = 1.670$	$[\text{N/mm}^2]$
Bruchdehnung	$\epsilon_u = 3,3$	$[\%]$
Spez. Gewicht	$\rho = 2,0$	$[\text{g/cm}^3]$
Temperaturkoeffizient	$\alpha_T = 0,7 \cdot 10^{-5}$	$[-]$

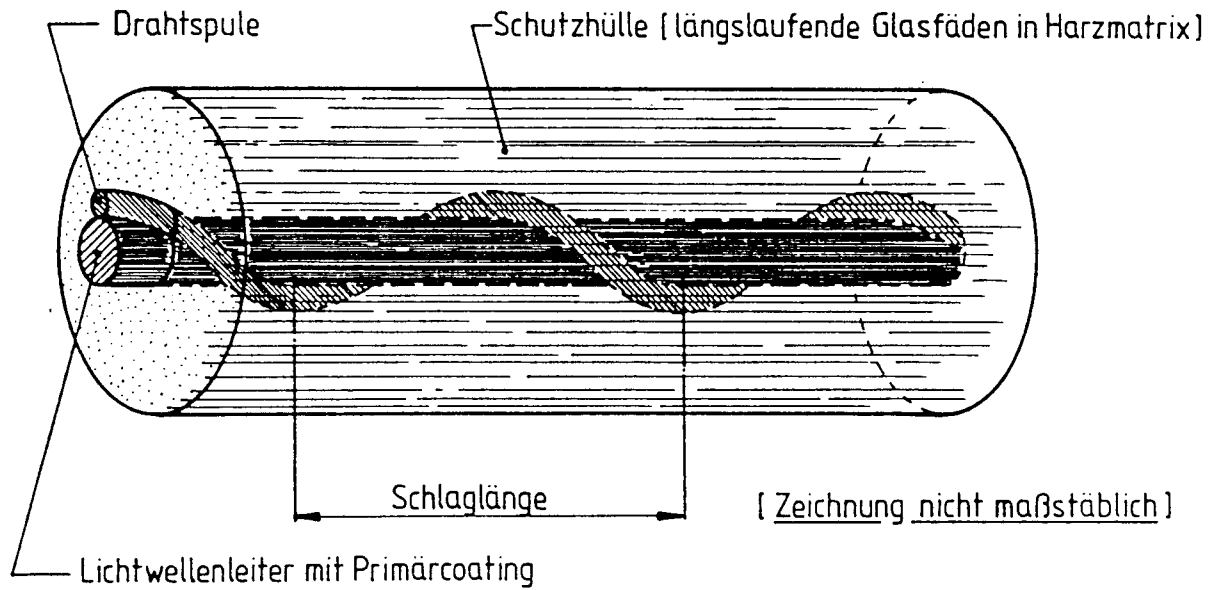


Bild 2.7: Schematische Darstellung des Dehnungssensors (aus [2])

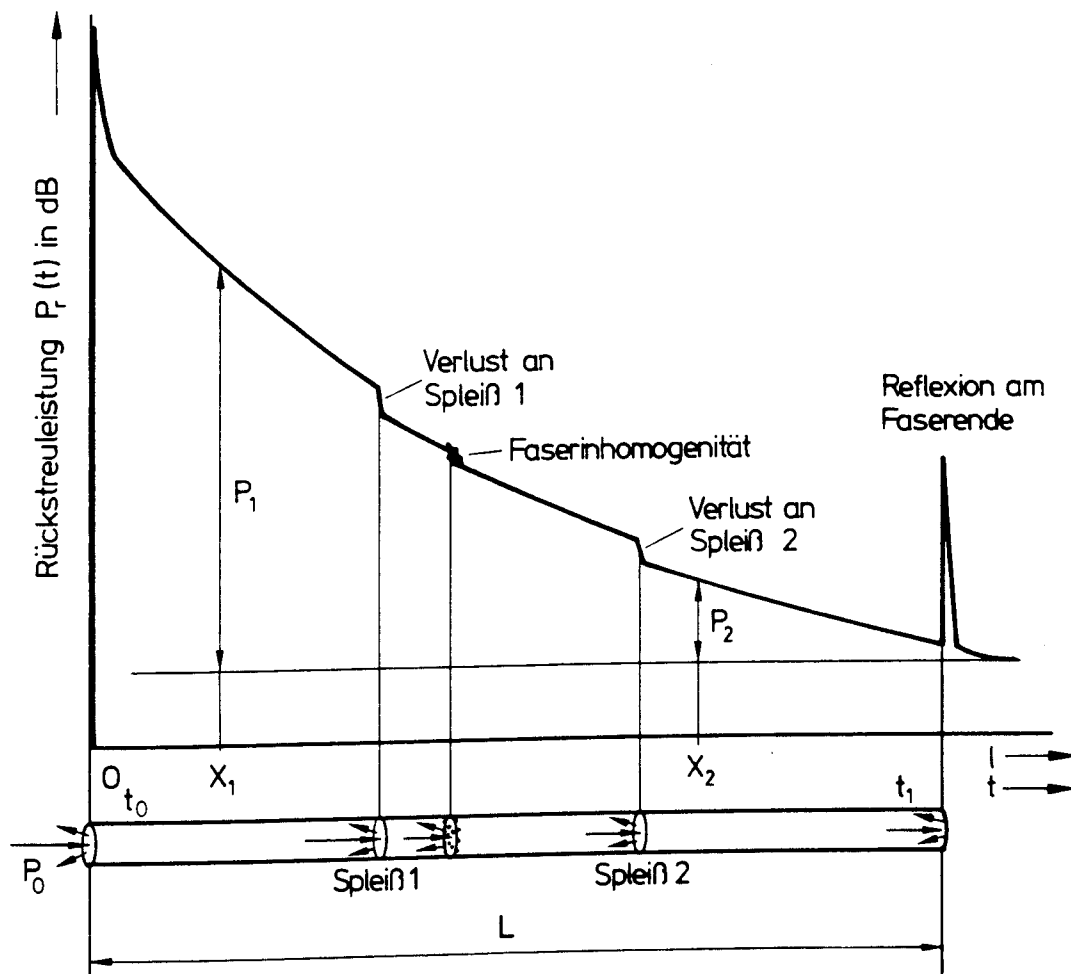


Bild 2.8: Meßkurve einer Rückstreuungsmessung

Bei üblichen Abmessungen des Polystal-Mantels von 2 mm Durchmesser beträgt die Bruchlast $P_u = 5,25 \text{ kN}$ und die Federsteifigkeit $c = 0,16 \text{ kN/m}$.

2.4 Meßtechnik des Dehnungssensors

Die Überwachung von Bauwerksverformungen durch Dehnungssensoren kann auf unterschiedlichen Aussageniveaus erfolgen:

Aussageniveau 1: Qualitative Aussage über die Rißbildung

Aussageniveau 2: Quantitative Aussage über die Gesamtverlängerung

Aussageniveau 3: Ortung von Rißbildungen

Aussageniveau 4: Quantitative Aussage über örtliche Dehnungszustände

Die Messungen für das Aussageniveau 1 und 2 erfolgen mit der integralen Dämpfungsmessung. Die Messungen für das Aussageniveau 3 und 4 erfolgen mit der Rückstreuungsmessung. Für das Aussageniveau 2 und 4 muß die Empfindlichkeit des LWL bekannt sein (siehe hierzu Abschnitt 2.5).

Dämpfungsmessung

Hierbei wird am Faseranfang durch eine LED oder Laserdiode ein Impuls mit der Leistung P_0 in die Faser eingespeist. Am Faserende wird durch eine Fotodiode die Leistung P_L gemessen. Beide Faserenden müssen hierfür zugänglich sein. Der Leistungsverlust wird als Integral über die Gesamtlänge als Dämpfung in dB gemessen. Ursache des Leistungsverlustes sind neben der Grunddämpfung Verluste in den Steckerverbindungen. Verformungen des LWL führen zu Dämpfungsänderungen gegenüber der Nullmessung. Moderne Meßgeräte haben eine Auflösung von ca. 0,005 dB.

Da auch Temperaturänderungen zu LWL-Verformungen und damit zu Dämpfungsänderungen führen, ist ggf. eine Temperaturkompensation vorzusehen. Signifikante Dämpfungssprünge zwischen zwei Messungen weisen auf Rißbildungen hin (Aussageniveau 1).

Bei Kenntnis der Empfindlichkeit des LWL kann hieraus die Gesamtverformung abgeleitet werden (Aussageniveau 2).

Rückstreuungsmessung

Das Rückstreumeßverfahren dient in der Nachrichtentechnik zur Detektion von Faserbrüchen. Hierbei wird ein kurzer Lichtimpuls am Faseranfang eingekoppelt, und das zum Faseranfang zurückgestreute Licht wird bezüglich Amplitude und Zeitverzögerung analysiert. Hierzu muß nur ein Faserende zugänglich sein. Da die Lichtgeschwindigkeit im LWL über die Brechzahl bekannt ist, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Zeitverzögerung und Entfernung. Moderne Meßgeräte erreichen eine Entfernungsauflösung von $\pm 0,30$ m bei einer Empfindlichkeit von 0,01 dB. Bild 2.8 zeigt den prinzipiellen Verlauf einer Rückstreu Kurve. Signifikante, örtliche Dehnungsänderungen führen zu Dämpfungssprüngen (Aussageniveau 3).

Bei Kenntnis der Empfindlichkeit des LWL kann aus der Rückstreu Kurve die Gesamtverformung sowie die Rißbreite und der Rißort bestimmt werden (Aussageniveau 4).

2.5 Eichung des Dehnungssensors

In [2] wird über Eichversuche an Dehnungssensoren (Polystal $\varnothing 2$ mm) berichtet. Hierzu wurde der Dehnungssensor in eine Zugprüfmaschine eingespannt und die Verlängerung Δl des LWL laststufenweise gesteigert. Die Ergebnisse sind in Bild 2.9 dargestellt. Unabhängig von der Einspannlänge l_0 besteht ein linearer, reproduzierbarer Zusammenhang zwischen der Dämpfungsänderung in dB und der Verlängerung Δl . Die ermittelte Empfindlichkeit des geprüften Dehnungssensors beträgt 0,25 dB/mm, Werte für die Grunddämpfung α werden nicht genannt. Gleichartige Dehnungssensoren standen für die unter Abschnitt 3 beschriebenen Versuche an Stahlbetonkörpern zur Verfügung.

Ob Querpressungen, die in der Verankerung des Dehnungssensors bei axialen Zugkräften während des Eichversuchs entstehen, einen signifikanten Einfluß auf die gemessenen Dämpfungsänderungen haben, ist bisher unbekannt. Ferner zeigen die bisherigen Erfahrungen, daß die infolge Fertigungstoleranzen auftretenden Schwankungen der Schlaglänge und der Wendelvorspannung sowohl bei der Grunddämpfung als auch bei der Empfindlichkeit des LWL zu größeren Streuungen führen. Daher wird auch in Zukunft die Eichung eines jeden LWL notwendig sein.

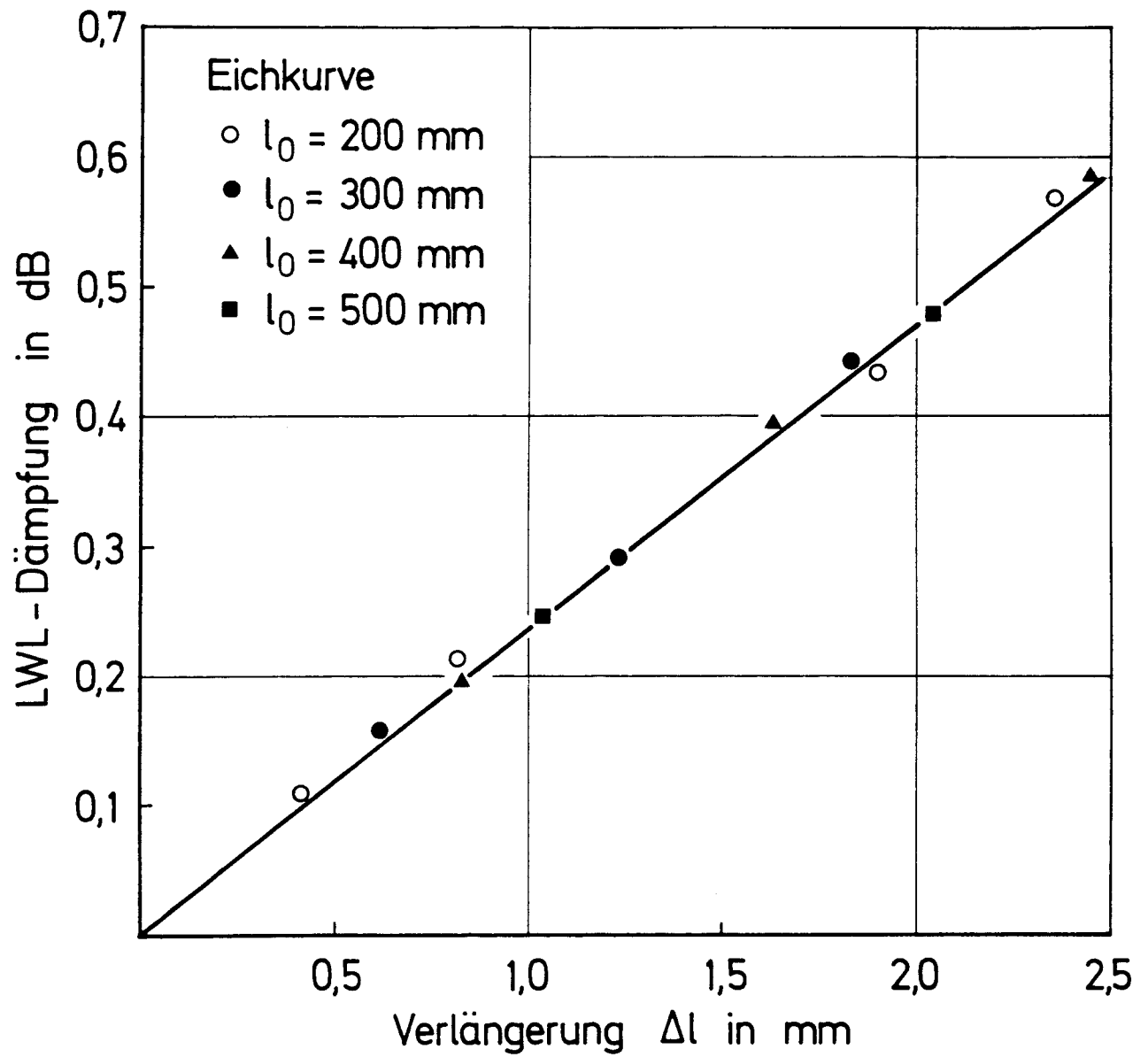


Bild 2.9: Eichkurve des Dehnungssensors

Aus der ermittelten Empfindlichkeit von 0,25 dB/mm und dem Temperaturkoeffizienten kann die Temperatur-Empfindlichkeit des LWL berechnet werden. Diese ist neben der Temperaturdifferenz ΔT auch von der Meßlänge l_0 abhängig und beträgt 0,002 dB/m·K.

3. Durchgeführte Versuche

Zur Beurteilung der Aussagekraft von Dämpfungsmessungen an Stahlbetonteilen wurden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig Versuche an einem Dehnkörper und einer auf Biegung beanspruchten Stahlbetonplatte durchgeführt.

Bei den Messungen wurde das Aussageniveau 2 angestrebt. Die Dämpfungsmessungen erfolgten daher integral über die LWL-Gesamtlänge.

Untersuchungsziel war der Einfluß des Verbundes Beton-LWL und der Ribbildung im Beton auf die Empfindlichkeit des LWL-Sensors.

3.1 Dehnkörper

Versuchsaufbau

Als Versuchskörper wurde ein zentrisch gezogener Dehnkörper aus Stahlbeton vorgesehen (Länge = 300 cm, Breite = Höhe = 22,5 cm). Der Versuchskörper wurde mit einer Wendelbewehrung \varnothing 5 mm versehen. Zur Krafteinleitung wurde ein Betonstahl \varnothing 28 mm zentrisch einbetoniert.

Der Dehnkörper wurde mit zwei LWL-Sensoren (Polystal-LWL \varnothing 2 mm, Empfindlichkeit 0,25 dB/mm) bestückt. Sensor 1 wurde zentrisch neben dem Bewehrungsstab einbetoniert, Sensor 2 wurde an der Betonstahlwendel befestigt. Die Betonüberdeckung betrug hier ca. 3 cm.

Die Verformung des Dehnkörpers wurde durch induktive Wegaufnehmer auf der Betonoberfläche auf einer Basislänge von 200 cm ermittelt. Bild 3.1 zeigt den Versuchsaufbau.

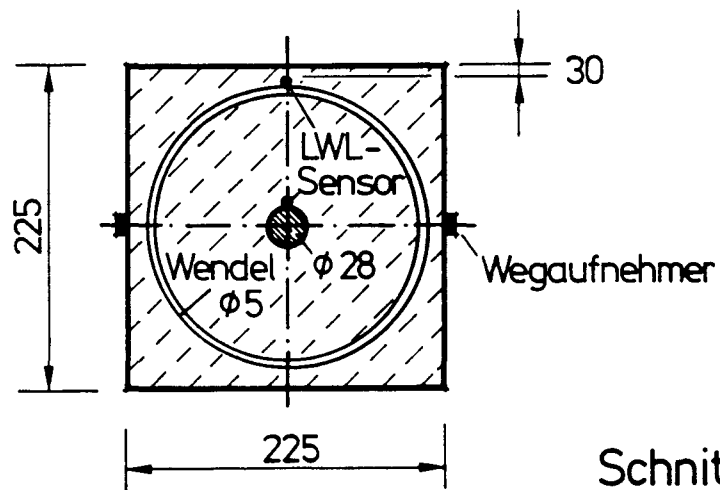
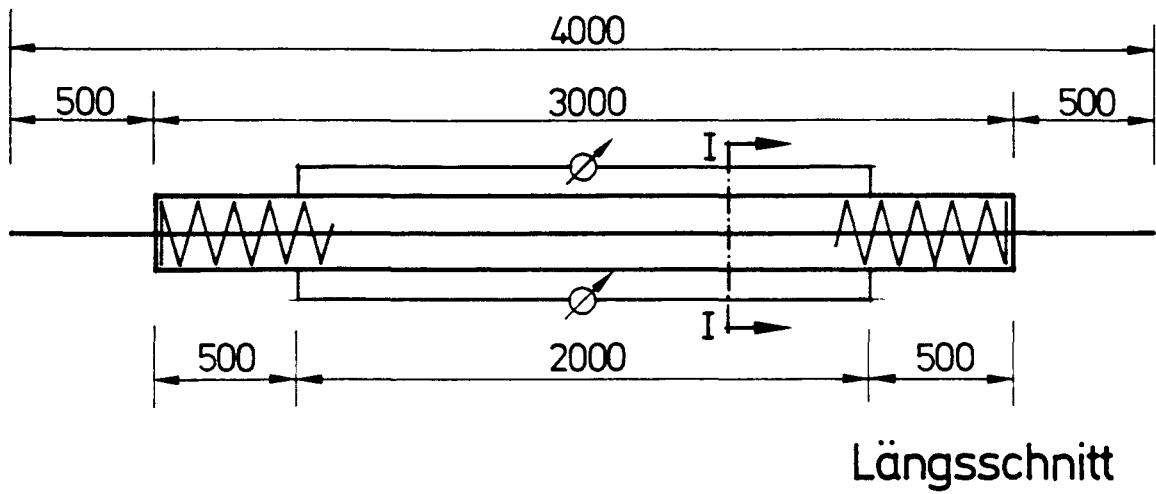


Bild 3.1: Versuchsaufbau des Dehnkörpers

Es wurden insgesamt drei Belastungszyklen durchgeführt. Der erste Belastungszyklus erfolgte in Laststufen von 5 kN, um die Rißbildung genauer verfolgen zu können. Die weiteren Belastungszyklen wurden in Laststufen von 10 kN durchgeführt.

Versuchsauswertung

Bild 3.2 zeigt das Kraft-Verlängerungs-Diagramm des Dehnkörpers. Die Verlängerung wurde hierbei als Mittelwert der beidseitigen Wegaufnehmermessungen ermittelt. Deutlich ist beim ersten Belastungszyklus die Rißbildung des Dehnkörpers und die daraus resultierende Abminderung der Dehnsteifigkeit zu erkennen. Die folgenden Belastungszyklen beeinflussen die Dehnsteifigkeit nicht, der Versuchskörper zeigt ein linear-elastisches Verhalten mit nur geringer Hysterese zwischen Be- und Entlastung.

Bild 3.3 zeigt das Kraft-Dämpfungs-Diagramm des Dehnkörpers. Der Kurvenverlauf entspricht dem in Bild 3.2. Die Rißbildungen beim ersten Belastungszyklus sind auch hier als Kurvenbereiche geringer Steigung identifizierbar.

Bild 3.4 zeigt den Vergleich der Wegaufnehmermessungen mit den Dämpfungsmessungen für den LWL-Sensor 1. Es wird deutlich, daß eine lineare Beziehung zwischen Dämpfung und Verlängerung nur für den zweiten Belastungszyklus besteht. Die Rißbildung im ersten Belastungszyklus führt zu erheblichen Abweichungen von der Linearität. Die unterschiedlichen Basislängen von Wegaufnehmermessung ($l_0 = 200 \text{ cm}$) und LWL-Messung ($l_0 = 300 \text{ cm}$) beeinflussen zwar die Steigung der Eichgeraden, können jedoch nicht die Ursache dieser Abweichungen sein. Auch Rißbildungen außerhalb der Wegaufnehmerbasis können hierfür nicht ursächlich sein, da der Kurvenzug dann oberhalb der Eichgeraden liegen müßte. Es wird daher vermutet, daß Schubbrüche in der Verbundzone zwischen LWL und Beton infolge Rißbildung im Beton als Ursache der Abweichung von der Linearität anzusehen sind.

Da alle Kurven durch den Koordinatenursprung laufen, kann für die Belastungszyklen eine starre, schlupffreie Einbettung des LWL im Beton angenommen werden.

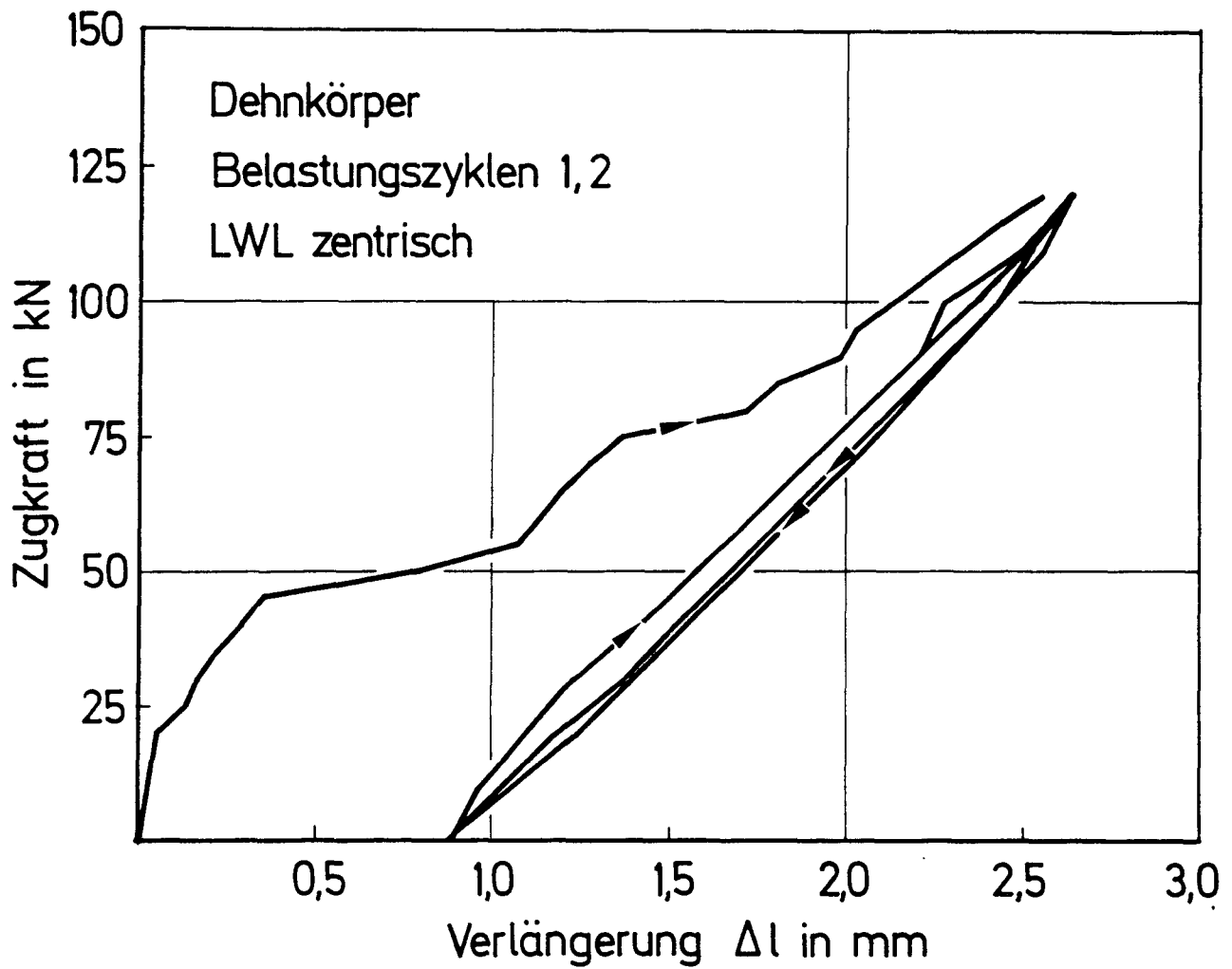


Bild 3.2: Kraft-Verlängerungs-Diagramm des Dehnkörpers

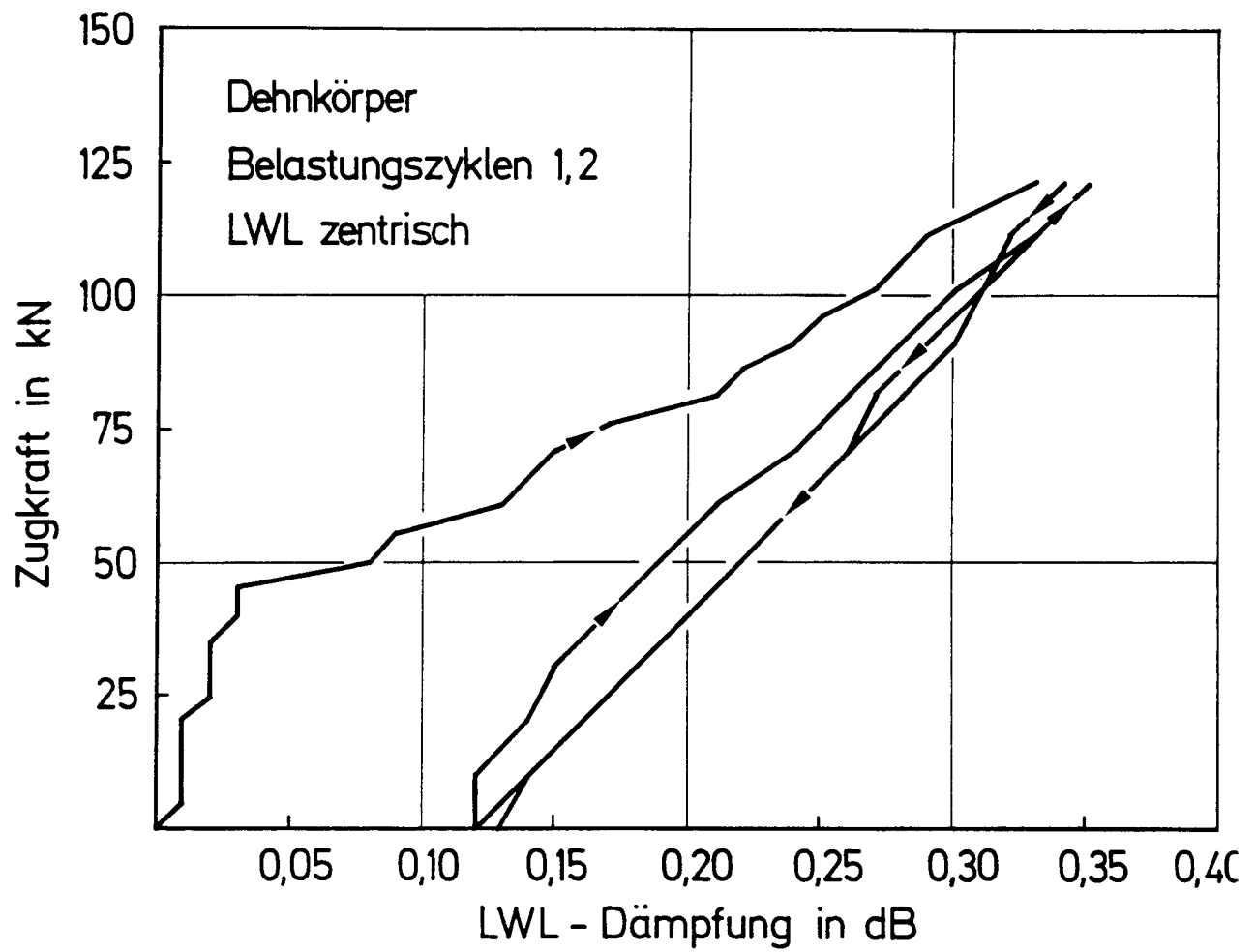


Bild 3.3: Kraft-Dämpfungs-Diagramm des Dehnkörpers

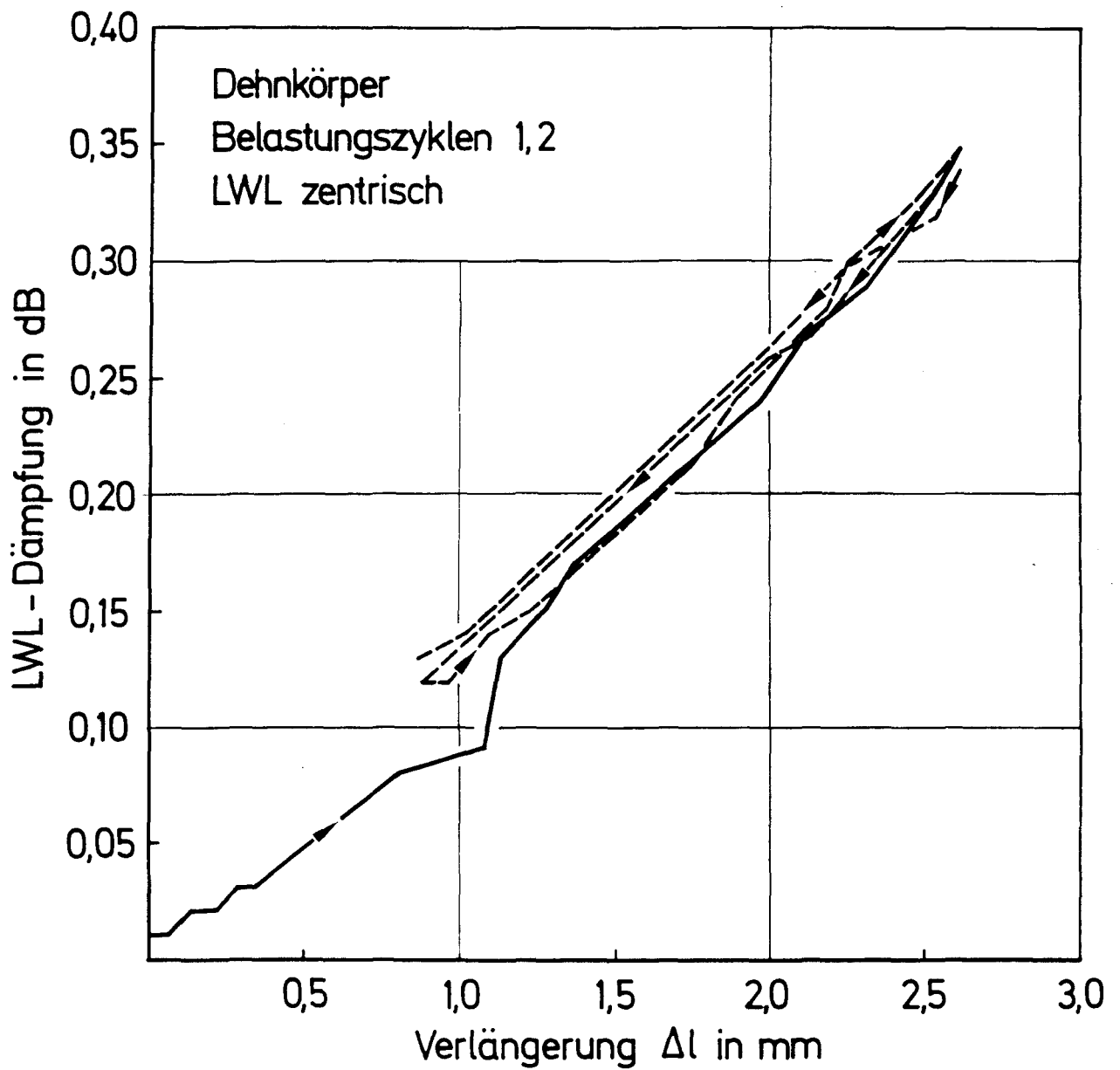


Bild 3.4: Dämpfungs-Verlängerungs-Diagramm des Dehnkörpers (LWL-Sensor 1)

Bild 3.5 zeigt den Vergleich der Wegaufnehmermessungen mit den Dämpfungsmessungen für den LWL-Sensor 2. Im Vergleich zum LWL-Sensor 1 zeigt der nahe der Betonoberfläche liegende LWL-Sensor 2 eine größere Hysterese zwischen Be- und Entlastung. Es konnte nicht geklärt werden, ob die Ursache hierfür in der oberflächennahen Lage des LWL oder im LWL selbst zu suchen ist. Die Steigung der Ausgleichsgeraden entspricht annähernd derjenigen des LWL-Sensors 1.

Zur Bestimmung der Empfindlichkeit der LWL-Sensoren im einbetonierten Zustand müssen die Dehnungsverteilungen und die unterschiedlichen Basislängen berücksichtigt werden (Bild 3.6). Die induktiven Wegaufnehmer messen ebenso wie die LWL-Sensoren über die Basislänge integrierte Verformungen. Infolge der größeren Basislänge der LWL-Meßstrecke stellt die aus der Ausgleichsgeraden des zweiten und dritten Belastungszyklus in Bild 3.4 ermittelte Steigung von 0,13 dB/mm daher nur einen oberen Grenzwert der Empfindlichkeit dar.

Ein unterer Grenzwert der Empfindlichkeit ergibt sich unter Berücksichtigung einer dreiecksförmigen Dehnungsverteilung in der Lasteinleitungslänge l_E mit $l_E = 50 + 0,1 d/\mu = 28$ cm und der Annahme einer konstanten mittleren Dehnungsverteilung auf der übrigen Meßlänge zu:

$$0,13 \frac{200}{300 - 28} = 0,10 \text{ dB/mm}$$

3.2 Biegekörper

Versuchsaufbau

Die Biegeversuche wurden an einer Stahlbetonplatte mit den Abmessungen $l = 392$ cm, $b = 100$ cm, $d = 18$ cm durchgeführt. Die Stahlbetonplatte wurde als Einfeldträger durch zwei Einzellasten in den Drittelpunkten der Stützweite belastet. Die Belastung erfolgte in Laststufen von 2 kN.

Der Dehnungssensor (Polystal $\varnothing 2$ mm, Empfindlichkeit 0,25 dB/mm) wurde auf der Oberseite (Zugseite) der Platte auf halber Plattenbreite in eine nachträglich eingeschnittene, längslaufende, ca. 10 mm tiefe Nut mit einem Kunststoffkleber eingeklebt.

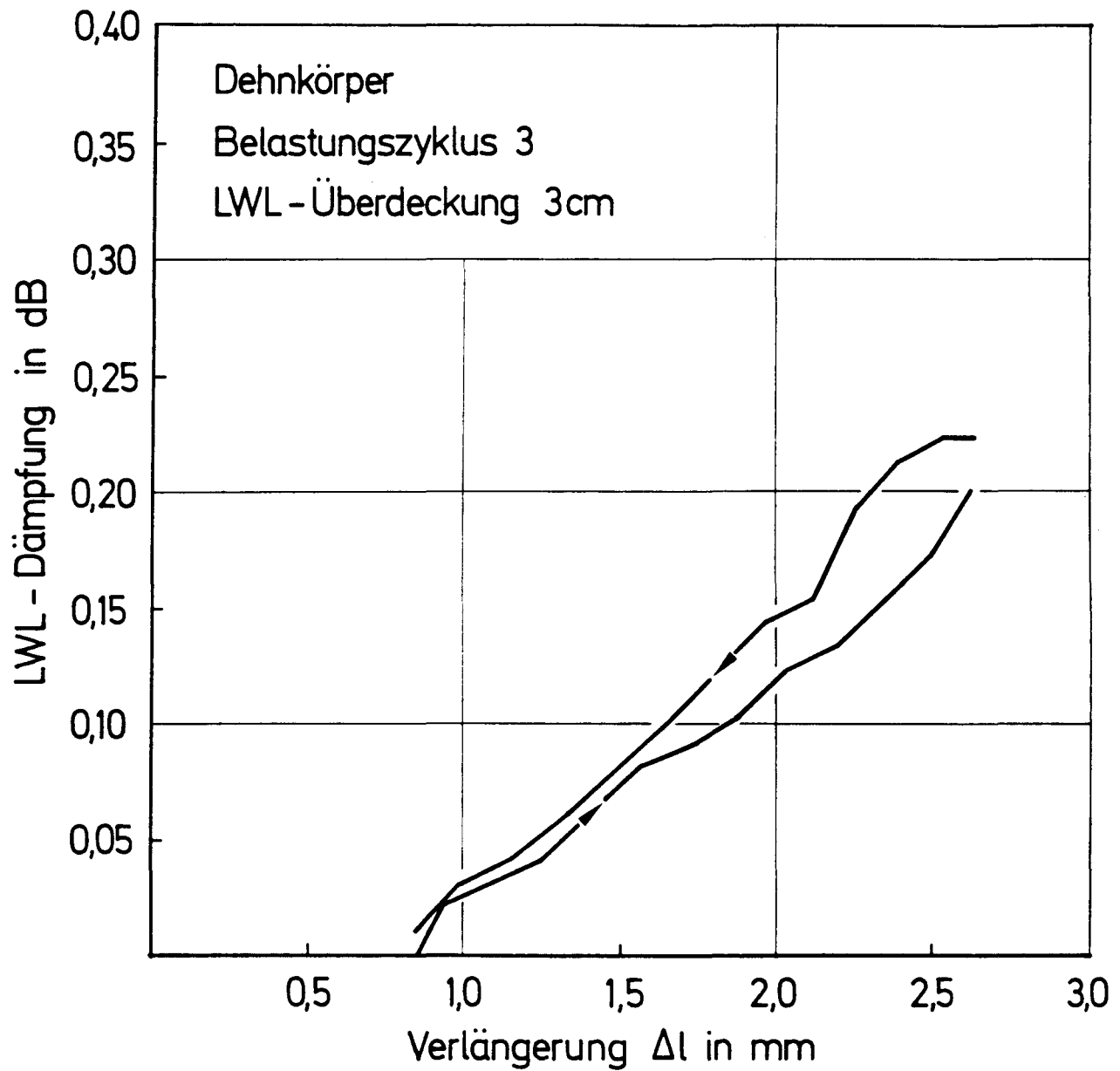


Bild 3.5: Dämpfungs-Verlängerungs-Diagramm des Dehnkörpers (LWL-Sensor 2)

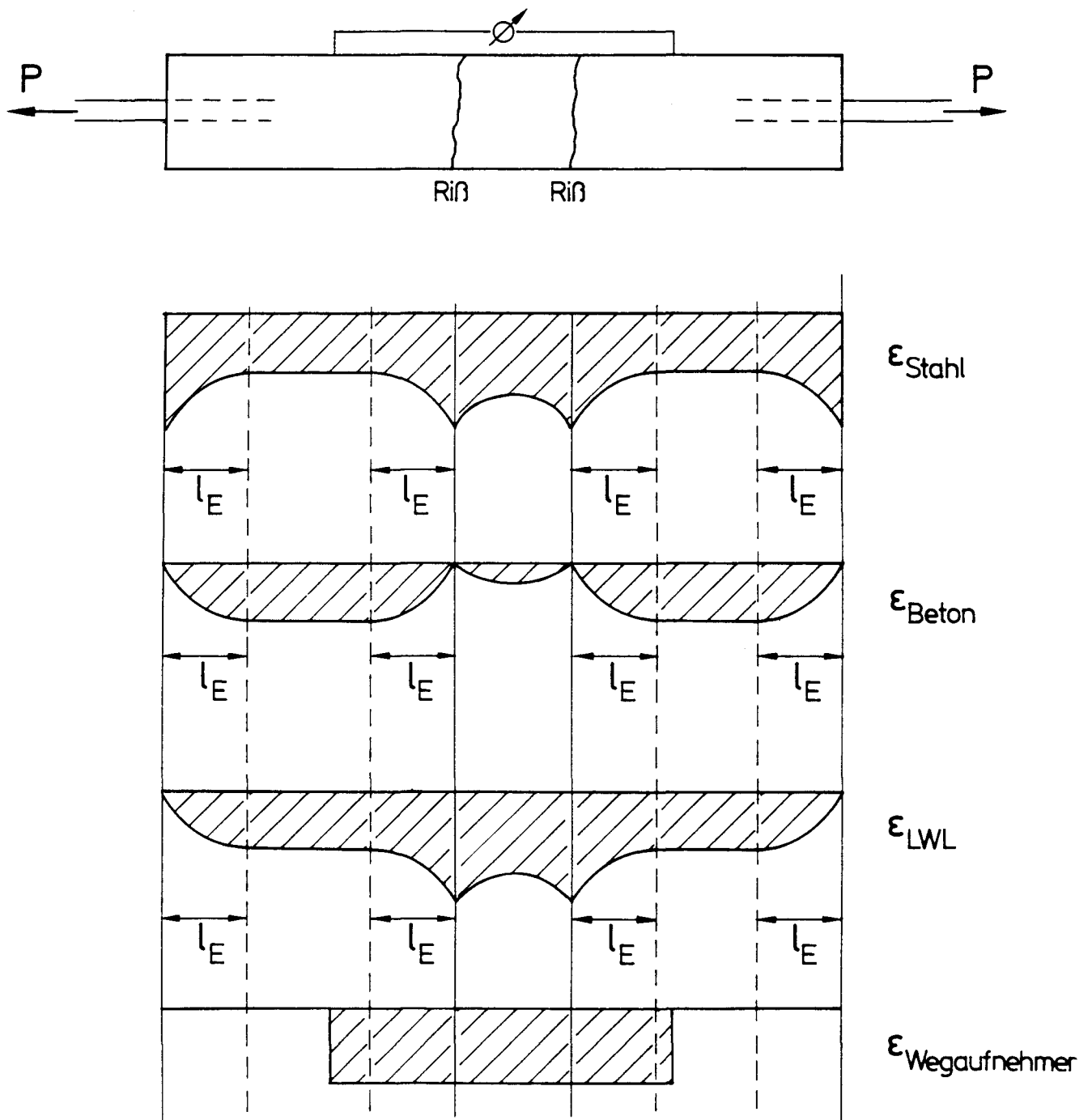


Bild 3.6: Dehnungsverteilung im gerissenen Dehnkörper

Zu jeder Laststufe wurde die LWL-Dämpfung und die Durchbiegung in Feldmitte (induktiver Wegaufnehmer) gemessen. Zusätzlich wurde bei den Laststufen 10 kN, 20 kN, 30 kN die Verformung der Zugseite mit 15 Setzdehnungsmeßstellen ermittelt. Die Lage im Querschnitt und die Basislänge des LWL-Sensors entsprechen denen der SDM-Meßstellen.

Bild 3.7 zeigt den Versuchsaufbau.

Versuchsauswertung

Bild 3.8 zeigt das Kraft-Dämpfungs-Diagramm des Biegekörpers. Wie beim Dehnkörper (Bild 3.3) führen Rißbildungen im Versuchskörper zu Dämpfungssprüngen.

Die zunehmende Steigung der Kurve im unteren Kraftbereich weist auf geringe Schlupfverformungen des LWL hin.

Bild 3.9 zeigt das Dämpfungs-Verlängerungs-Diagramm des Biegekörpers. Die aufgetragenen Verlängerungen der Zugseite wurden durch Summation der Setzdehnungsmessungen ermittelt. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Verlängerung und Dämpfung, wobei allerdings die geringe Anzahl an Wertepaaren zu berücksichtigen ist. Die aus der Steigung der Geraden zu ermittelnde Empfindlichkeit des eingeklebten LWL ergibt sich zu 0,04 dB/mm.

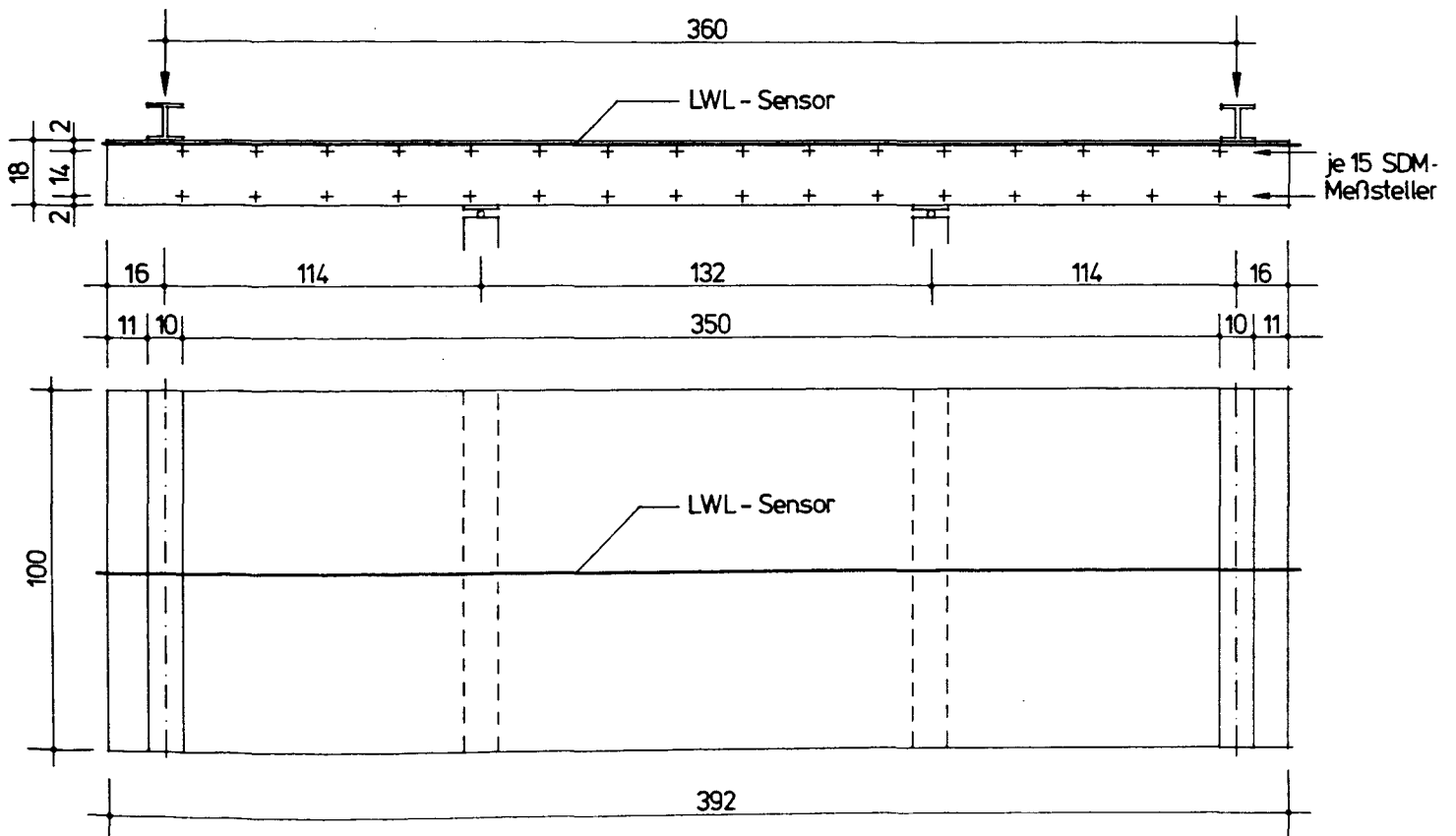


Bild 3.7: Versuchsaufbau des Biegekörpers

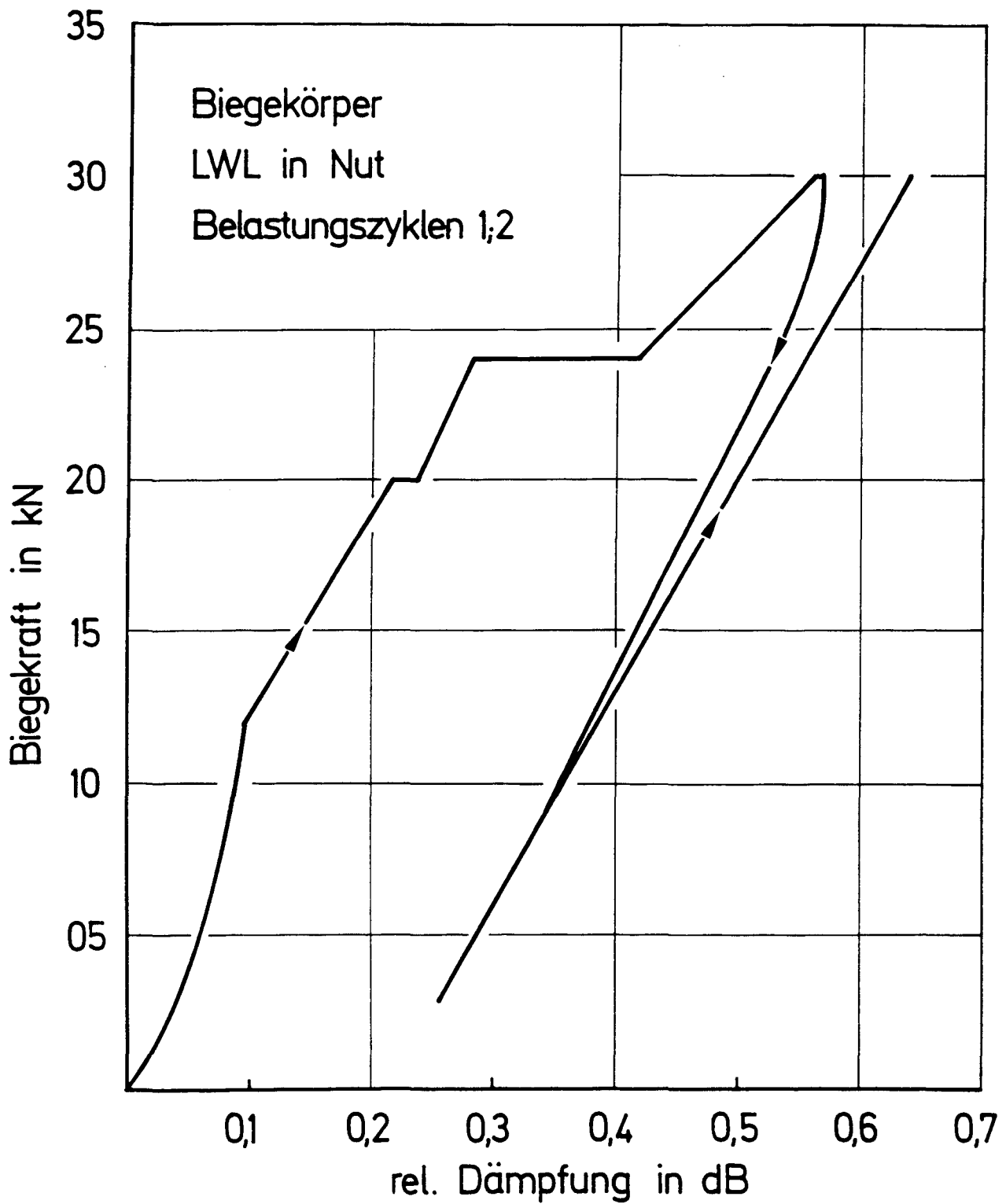


Bild 3.8: Kraft-Dämpfungs-Diagramm des Biegekörpers

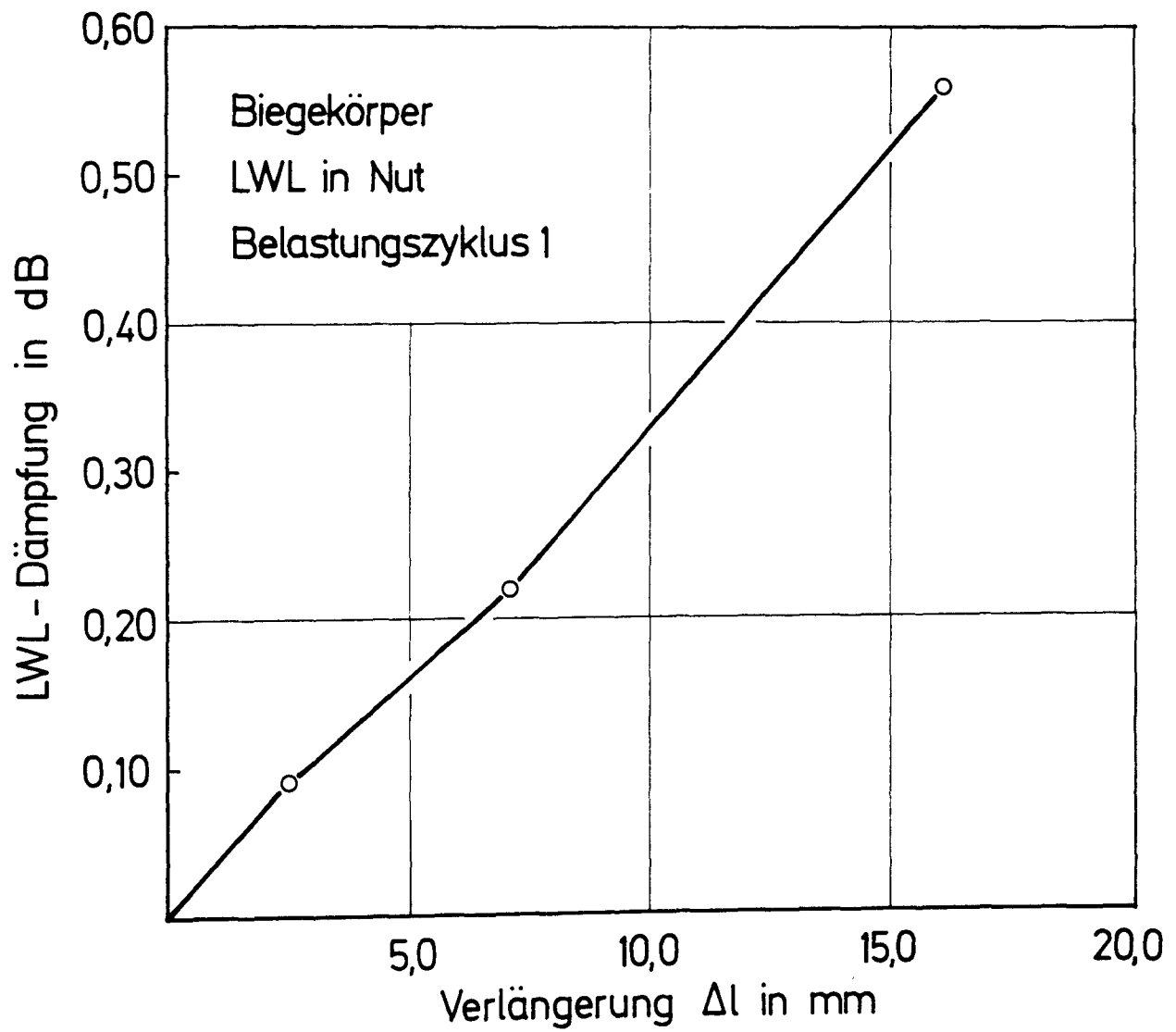


Bild 3.9: Dämpfungs-Verlängerungs-Diagramm des Biegekörpers

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß eine Überwachung von Bauwerksverformungen mittels Dehnungssensoren auf dem Aussageniveau 1 grundsätzlich möglich ist.

Werden LWL-Sensoren in Stahlbetonbauteilen einbetoniert oder nachträglich in eine Nut eingeklebt, können Rißbildungen anhand von Dämpfungsänderungen erkannt werden. Aus den Versuchsergebnissen kann weiter geschlossen werden, daß sich auch Mauerwerksbauten zur Überwachung auf dem Aussageniveau 1 eignen, wenn die LWL-Sensoren in der Lagerfuge vermörtelt werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen ferner, daß die vom Hersteller genannte Empfindlichkeit (0,25 dB/mm), die in einem Zugversuch am LWL ermittelt wird, nicht der Empfindlichkeit des LWL im einbetonierten Zustand entspricht (0,10 bzw. 0,04 dB/mm). Es wird vermutet, daß das Dämpfungssignal nicht nur von der integralen Gesamtverlängerung, sondern auch von differentiellen Dehnungszuständen abhängig ist. Zur Klärung dieser Zusammenhänge bedarf es jedoch weiterer Versuchsserien. Eine Überwachung von Bauwerksverformungen mittels Dehnungssensoren auf dem Aussageniveau 2 erscheint daher zur Zeit noch nicht möglich.

4. Ausblick

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß für die Überwachung von Bauwerksverformungen mittels LWL-Technik noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Der Umfang der notwendigen Untersuchungen ist abhängig vom angestrebten Aussageniveau.

Aussageniveau 1

Die LWL-Technik ist im derzeitigen Entwicklungsstand geeignet, als Alarmgeber für kritische Bauwerksverformungen zu dienen. Es konnte nachgewiesen werden, daß der Dehnmeßsensor auch im Verbund liegend auf Dehnungsänderungen mit Dämpfungssprüngen reagiert.

Aussageniveau 2

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß eine Ermittlung der Gesamtverlängerung eines Bauteils anhand von Dämpfungsmessungen nicht möglich ist. Die bisher vom Hersteller durchgeführten Zugversuche am LWL können lediglich zur Prüfung von Fertigungstoleranzen, also der individuellen Kalibrierung eines LWL, dienen. Die Empfindlichkeit des im Verbund liegenden LWL kann mit diesem Versuch nicht festgestellt werden. Hierzu müssen umfangreiche Versuche zum Einfluß der Schubsteifigkeit des Verbundes und örtlicher Dehnungsspitzen auf das Dämpfungsverhalten durchgeführt werden.

Aussageniveau 3

Die Ortung von Rißbildungen auch über große Meßlängen ist zweifelsohne ein für die Bauüberwachung besonders interessantes Meßverfahren. Die Kenntnis der LWL-Empfindlichkeit ist hierfür grundsätzlich nicht notwendig. Allerdings kann bisher die für ein signifikantes Dämpfungssignal erforderliche Mindestrißbreite nicht angegeben werden. Hierfür sind weitere Untersuchungen notwendig.

Aussageniveau 4

Die quantitative Auswertung örtlicher Dehnungszustände erscheint bei dem derzeitigen Entwicklungsstand als noch nicht realisierbar. Erst nach Durchführung der beim Aussageniveau 2 für notwendig erachteten Untersuchungen kann geklärt werden, ob die genannten Ziele mit der LWL-Technik erreichbar sind.

Abhängig vom speziellen Anwendungsfall ergeben sich aus den charakteristischen Eigenschaften des LWL-Sensors und den Möglichkeiten der Meßtechnik

einige Besonderheiten für die Applikation und die Interpretation der Meßergebnisse, auf die abschließend kurz hingewiesen werden soll.

Wird die Überwachung von Verformungen in Betonkonstruktionen angestrebt, wird empfohlen, die Dehnungssensoren einzubetonieren. Dehnungssensoren mit Polystalmantel und 2 mm Durchmesser besitzen hierfür eine ausreichende mechanische Robustheit. Zu berücksichtigen ist allerdings, daß das Polystalmaterial nicht alkalienbeständig ist, weshalb ein spezielles Coating der Dehnungssensoren empfehlenswert ist. Das Coating muß durch ausreichende Schubsteifigkeit einen Schlupf des LWL verhindern können. Eine nachträgliche Applikation des LWL an Betonbauteilen kann durch Einkleben in eine gefräste Nut erfolgen. Bei der Überwachung von mehrfeldrigen Brückenträgern ist zu beachten, daß mit dem Dehnungssensor nur die Summe der Zugdehnungen ermittelt wird, während Stauchungen kein Meßsignal bewirken.

Die Überwachung von Spanngliedern mit nachträglichem oder sofortigem Verbund stellt derzeit den wichtigsten Anwendungsfall der LWL-Technik dar. Da die Dehnungssensoren die gleiche Vorspannung erfahren wie das Spannglied, ist eine geeignete Auslegung der Empfindlichkeit besonders wichtig: Ist die Empfindlichkeit zu groß, können die Leistungsverluste infolge Vorspannung insbesondere bei langen Spanngliedern so groß werden, daß an der Empfangsdiode keine Leistung meßbar ist. Ist die Empfindlichkeit zu gering, können Rißbildungen nicht erkannt werden. Bei außenliegenden Spanngliedern ohne Verbund kommt der Temperaturkompensation eine entscheidende Bedeutung zu. Da sich Dehnungsänderungen nur an Umlenkpunkten ergeben können, sollten Kraftmeßdosen zur Kontrolle der Vorspannkräfte bei Vorspannung ohne Verbund bevorzugt werden.

Die Anwendung der LWL-Technik zur Verformungskontrolle von Mauerwerksbauten ist derzeit noch nicht erprobt, erscheint aber sinnvoll. Bei künstlichem oder natürlichen Mauerwerk mit durchgehenden Lagerfugen kann der Dehnungssensor bei der Herstellung oder nachträglich im Mörtelbett angeordnet werden. Bei unregelmäßigem Fugenbild erscheint die Ankopplung des Dehnungssensors an das Mauerwerk über Dübel (punktuellem Verbund) möglich. Hierbei müssen allerdings Signalverzerrungen infolge Durchhang u.a. berücksichtigt werden. Daher wird die LWL-Technik hier nur als qualitativer Alarmgeber (Aussageniveau 1) einsetzbar sein.

5. Literatur

- [1] Lutzke, D.: Lichtwellenleiter-Technik, Pflaum-Verlag München, 1986.
- [2] Entwicklung von Verfahren zur Qualitätskontrolle und Überwachung von kritischen Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen mittels Lichtwellenleiter; Forschungsbericht, Felten und Guillaume Energietechnik GmbH, Köln.
- [3] Miesslerer, H.-J.; Lessing, R.: Monitoring of Load Bearing Structures with Optical Fiber Sensors; IABSE Symposium, Lissabon, 1989.
- [4] McKeehan, D.S., et al.: Marine Applikationen for a Continuous Fiber Optic Strain Monitoring System; 18th Annual Offshore Technology Conference, Houston, 1986.
- [5] Miesslerer, H.-J.; Wolff, R.: Bauwerksbeobachtung mit Lichtwellenleitern; Veröffentlichung vorgesehen, Internationales ZfPBAU-Symposium Berlin, 1991.